(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
1 février 2001 (01.02.2001)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 01/08088 A1

(51) Classification internationale des brevets[7]:
G06K 19/073

(21) Numéro de la demande internationale:
PCT/FR00/02058

(22) Date de dépôt international: 17 juillet 2000 (17.07.2000)

(25) Langue de dépôt: français

(26) Langue de publication: français

(30) Données relatives à la priorité:
99/09555 22 juillet 1999 (22.07.1999) FR

(71) Déposant *(pour tous les États désignés sauf US)*: SCHLUMBERGER SYSTEMES [FR/FR]; 50, avenue Jean Jaurès, F-92120 Montrouge (FR).

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant *(pour US seulement)*: LEYDIER, Robert [FR/FR]; 5, allée des Planches, F-91400 Orsay (FR).

(74) Mandataire: UTZMANN-NORTH, Anne; Schlumberger Systèmes, 50, avenue Jean Jaurès, Boîte postale 620 12, F-92542 Montrouge (FR).

(81) États désignés *(national)*: CN, JP, US.

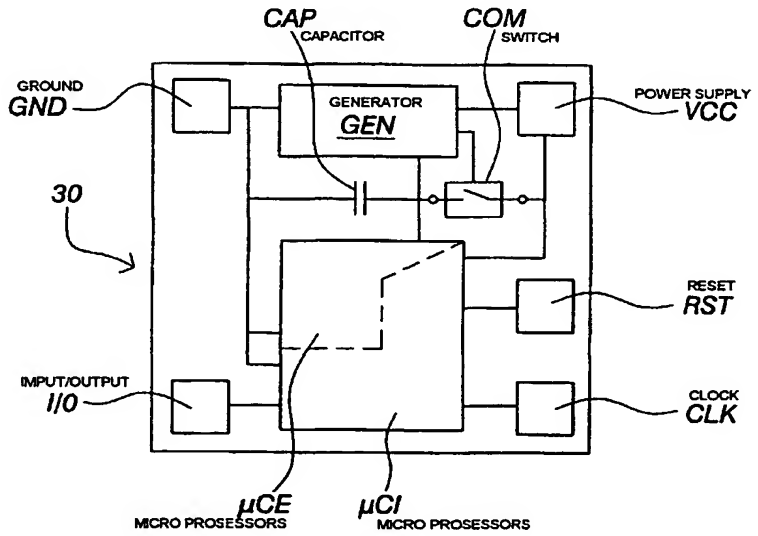
(84) États désignés *(régional)*: brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

Publiée:
— *Avec rapport de recherche internationale.*

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: SECURE MICROCONTROLLER AGAINST ATTACKS BASED ON CURRENT CONSUMPTION VALUES

(54) Titre: MICRO-CONTROLEUR SECURISE CONTRE LES ATTAQUES EN COURANT



(57) Abstract: The invention concerns a microcontroller (30) designed to be incorporated in a portable object such as a smart card, comprising at least: a contact plate (VCC) for powering said microcontroller (30); a data input and/or output pad (I/O); an effective data processing part (°CE); and confidential data. The invention is characterised in that the microcontroller further comprises means (GEN; CAP; COM) for varying the supply voltage of the effective data processing part (°CE), said means being capable of making secure the confidential data against attacks based on current consumption values.

[Suite sur la page suivante]

WO 01/08088 A1

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) Abrégé: L'invention concerne un micro-contrôleur (30) destiné à être incorporé dans un objet portatif du type carte à puce, comprenant au moins: un plot (VCC) pour l'alimentation en courant dudit micro-contrôleur (30); un plot (I/O) d'entrée et/ou de sortie de données; une partie efficace de traitement de données (°CE); et des informations confidentielles. Selon l'invention, le micro-contrôleur comprend en outre: des moyens (GEN, CAP, COM) pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement des données (°CE), lesdits moyens étant aptes à sécuriser lesdites données confidentielles contre des attaques en courant.

MICRO-CONTROLEUR SECURISE CONTRE LES ATTAQUES EN COURANT

L'invention concerne des micro-contrôleurs destinés à être incorporés dans des objets portatifs et, en particulier, dans de tels objets au format carte plus communément appelés cartes à puce.

Les cartes à puce sont en général utilisées dans des applications dans lesquelles la sécurité du stockage et du traitement de données confidentielles sont essentielles. Elles sont notamment destinées à des applications du domaine de la santé, à des applications de la télévision à péage, ou encore, à des applications bancaires par exemple dites de porte-monnaie électronique.

Les micro-contrôleurs sont des automates programmés réalisés sous forme de circuit intégré. Ils appliquent une suite d'instructions logiques aux données issues de leurs mémoires internes ou provenant du monde extérieur, par l'intermédiaire d'un plot d'entrée/sortie.

Habituellement, les micro-contrôleurs de cartes à puce sont conçus en technologie CMOS. Cette technologie permet d'intégrer, dans un même circuit, des sous-ensembles utiles au fonctionnement du micro-contrôleur, c'est-à-dire notamment une unité centrale de traitement CPU, des mémoires non volatiles non réinscriptibles et en lecture seule de type ROM (Read Only Memory), des mémoires non volatiles réinscriptibles de type Flash, EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) ou FRAM (Ferromagnetic Random Access Memory) et des mémoires volatiles RAM (Random Access Memory).

Des fraudeurs ont développés des attaques dites en courant en vue d'obtenir des données confidentielles gérées par le micro-contrôleur et par exemple des clés destinées à la mise en oeuvre d'algorithmes de cryptage implementés dans les micro-contrôleurs tels que les

algorithmes connus sous les noms de DES (Data Encryption Standard) ou de RSA (Rivest Shamir Adelman).

Ces attaques sont basées sur le principe suivant lequel l'énergie $Ec_{\mu C}$ consommée par un micro-contrôleur exécutant, dans un intervalle de temps T, une instruction INS appliquée à des opérandes OPE, est toujours la même et constitue une signature. Autrement dit :

$$Ec_{\mu C} (T ; INS ; OPE) = \text{constante}.$$

On notera que, dans la relation ci-dessus, ainsi que dans les relations qui suivront dans la présente description, le signe "=" signifie "sensiblement égal".

Pour la mise en oeuvre des attaques en courant, les fraudeurs connectent notamment une résistance R de faible valeur, notamment d'1 Ω, en série entre une source d'alimentation en tension $V_{\mu C}$ du micro-contrôleur et son plot d'alimentation VCC. Ils visualisent alors les variations de la tension R Icc(t) en fonction du temps obtenues en réponse à l'exécution de plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'instructions appliquées à des opérandes identiques, semblables ou différentes au moyen d'un ordinateur couplé, par exemple, à un oscilloscope numérique qui amplifient ces variations, les échantillonnent et numérisent les résultats obtenus en vue d'une analyse en temps différé.

De telles attaques, qui ont la particularité d'être non destructives, sont redoutables.

C'est la raison pour laquelle les fabricants de micro-contrôleurs et les fabricants de cartes ont développé des procédés destinés à sécuriser les micro-contrôleurs contre ces attaques.

La plupart de ces procédés proposent d'utiliser des programmes qui font intervenir un déclenchement d'opérations à des moments pseudo-aléatoires ou font intervenir des opérations qui génèrent un

bruit riche en informations aléatoires ou erronées au cours de l'exécution des instructions par le micro-contrôleur.

Ces procédés montrent cependant de multiples inconvénients. Le temps d'exécution des programmes est long. L'espace mémoire qu'ils occupent est important. Enfin, les données confidentielles ne sont finalement pas protégées contre une analyse approfondie réalisée par les fraudeurs puisque la signature électrique, qui résulte de l'exécution des instructions, est toujours présente.

Un autre procédé, décrit dans la demande de brevet français enregistrée sous le numéro 98 01305, et non rendue publique à la date de priorité de la présente demande, propose de filtrer le courant par une cellule de filtrage passe-bas. Ce procédé permet uniquement d'atténuer les signatures électriques et leur analyse précise permet en définitive d'accéder à certaines données confidentielles.

Compte tenu de ce qui précède, un problème technique que se propose de résoudre l'invention est de sécuriser, un micro-contrôleur destiné à être incorporé dans un objet portatif du type carte à puce, comprenant au moins :

- un plot pour l'alimentation en courant dudit micro-contrôleur ;
- un plot d'entrée et/ou de sortie de données ;
- une partie efficace de traitement de données ; et
- des données confidentielles,

contre des attaques en courant.

La solution de l'invention à ce problème a pour objet un tel micro-contrôleur, caractérisé en ce qu'il comprend en outre :

- des moyens pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement de données, lesdits moyens étant aptes à sécuriser lesdites données confidentielles contre des attaques en courant.

Etant donné que la consommation en énergie de ladite partie efficace de traitement de données peut être estimée comme étant directement proportionnelle au carré de sa tension d'alimentation, une variation de cette tension bouleverse les signatures électriques et rend leur analyse difficile voire impossible.

De manière avantageuse, les moyens pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement de données comprennent : - une résistance variable en fonction du temps connectée en série avec le plot d'alimentation du micro-contrôleur, cette résistance variable étant par exemple un commutateur ouvert pendant des intervalles de temps T_{off} et fermé pendant des intervalles de temps T_{on}, le rapport cyclique $T_{off}/(T_{on} + T_{off})$ variant en fonction du temps, la période $T_{on} + T_{off}$ variant en fonction du temps.

Par ailleurs, les moyens pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement de données comprennent avantageusement un générateur d'impulsions, ce générateur d'impulsions comprenant un circuit de synchronisation de franchissement de seuil de tension aux bornes de la partie efficace de traitement de données.

Enfin, les moyens pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement de données comprennent en outre avantageusement un condensateur, ce condensateur étant par exemple une capacité dont la capacité est supérieure à 0,1 nanofarad.

Dans certains modes de réalisation avantageux de l'invention le micro-contrôleur comporte une couche principale de silicium dont la face active, qui intègre un circuit et porte les plots de contact, est scellée à une couche complémentaire de protection au moyen d'une couche de scellement, les moyens pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement des données étant situés dans la couche complémentaire de protection.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de l'exposé non limitatif qui suit, rédigé au regard des dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 montre, en perspective, une carte à puce selon l'invention ;
- la figure 2 montre, en coupe transversale, une carte à puce selon l'invention ;
- la figure 3 montre, en vue de face, les plages de contact d'une carte à puce selon l'invention ;
- la figure 4 montre, en perspective, un micro-contrôleur selon l'invention ;
- la figure 5 schématise les différentes parties constitutives d'un micro-contrôleur selon l'invention ;
- la figure 6A représente la couche active du micro-contrôleur selon l'invention montré à la figure 4 ;
- la figure 6B représente la couche complémentaire du micro-contrôleur selon l'invention montré à la figure 4 ;
- la figure 7 schématise un inverseur CMOS d'une partie efficace de traitement des données d'un micro-contrôleur selon l'invention ;
- la figure 8 montre les variations du signal V_e de commande, de l'intensité i_{cc} d'alimentation et du signal V_s de sortie de l'inverseur CMOS de la figure 7 en fonction du temps ;
- la figure 9 est un schéma électrique d'un micro-contrôleur selon l'invention ;
- les figures 10A à 10D montrent, respectivement, les variations du signal S, de l'intensité du courant I_{CAP}, de la tension $V_{\mu CE}$ et de l'intensité Icc du courant d'alimentation d'un micro-contrôleur selon l'invention en fonction du temps ;
- la figure 11 est un enregistrement comparatif des variations de l'intensité Icc du courant en fonction du temps dans le cas d'un

micro-contrôleur selon l'état de la technique (signature A) puis dans le cas d'un micro-contrôleur sécurisé selon l'invention (signature B) ;

- la figure 12 est un schéma électrique d'un mode de réalisation particulier d'un micro-contrôleur selon l'invention ; et
- la figure 13 montre les variations des signaux S_1, S_2 et S_3 en fonction du temps, dans le cas d'un micro-contrôleur correspondant au mode de réalisation de la figure 12.

Les objets portatifs selon l'invention sont des objets normalisés définis notamment dans les différentes parties de la norme ISO7816 dont le contenu est incorporé aux présentes, par citation de référence. Dans le mode de réalisation montré aux figures 1, 2 et 3, un tel objet se présente sous la forme d'une carte 1 sensiblement parallélépipèdique rectangle et de faible épaisseur dont un corps 2 intègre un module 3 électronique.

Le corps 2 de carte est par exemple constitué de cinq feuilles 20, 21, 22, 23 et 24 plastiques laminées et comporte une cavité 25 pour l'incorporation du module 3.

Le module 3 comprend un micro-contrôleur 30 dont des plots 300 de contact sont connectés électriquement, au moyen de fils 31 conducteurs, à des plages 32 de contact affleurantes à la surface du corps 2 de carte. Ces plages 32 reposent sur une épaisseur 33 d'un diélectrique du type verre époxy. L'ensemble micro-contrôleur 30 et fils 31 conducteurs est enrobé dans une résine 34 protectrice.

Dans le mode de réalisation de la figure 4, le micro-contrôleur 30 se présente sous la forme d'un parallélépipède rectangle dont l'épaisseur est de l'ordre de 180 µm et dont la surface est de l'ordre de 10 mm^2.

Ce micro-contrôleur 30 comporte une couche principale 301 de silicium dont la face active, qui intègre un circuit et porte les plots 300

de contact, est scellée à une couche complémentaire 302 de protection de silicium au moyen d'une couche de scellement 303. Cette couche complémentaire 302 est munie d'ouvertures 304 situées à l'aplomb des plots 300 en vue de permettre leur connexion aux plages 32.

En pratique, les plots 300 sont au nombre de cinq. Il s'agit des plots VCC, RST, CLK, I/O et GND respectivement connectés aux plages de contact VCC, RST, CLK, I/O et GND du module 3. Le plot d'alimentation VCC est destiné à alimenter le micro-contrôleur. Le plot de remise à zéro RST est destiné à la transmission d'un signal de remise à zéro au micro-contrôleur, le plot d'horloge CLK est destiné à la transmission d'un signal d'horloge au micro-contrôleur, le plot d'entrée/sortie I/O est destiné à permettre les échanges de données logiques entre le micro-contrôleur et le monde extérieur et le plot de mise à la masse GND permet la mise à la masse du micro-contrôleur.

Le circuit intégré du micro-contrôleur 30 selon l'invention comporte différentes parties actives. Il s'agit notamment d'une partie micro-contrôleur interface µCI et d'une partie efficace de traitement des données µCE montrées à la figure 5.

La partie micro-contrôleur interface ou micro-contrôleur interface µCI comporte avantageusement uniquement des moyens qui consomment une énergie qui n'est pas susceptible de révéler des informations quant aux données confidentielles traitées par le micro-contrôleur. En pratique, le micro-contrôleur interface µCI comprend par exemple une pompe de charge ou des circuits d'interface associés aux plots RST, CLK et I/O. En ce qui concerne le plot RST, il s'agit notamment de moyens de détection d'un signal d'initialisation et de moyens associés d'initialisation du micro-contrôleur. En ce qui concerne le plot CLK, il s'agit de moyens de détection de fréquences comprises entre une limite basse et une limite haute. Enfin, en ce qui concerne le plot I/O, il s'agit de moyens destinés à permettre au micro-

contrôleur communiquer en passant d'un mode entrée à un mode sortie ou réciproquement.

La partie efficace de traitement des données ou micro-contrôleur efficace μCE est une partie du micro-contrôleur 30 qui comprend des sous-ensembles dont des inverseurs sont destinés au traitement des données confidentielles. Elle constitue de ce fait la partie du micro-contrôleur susceptible de donner aux fraudeurs, des informations sur ces données confidentielles. En pratique, elle comporte l'unité centrale de traitement CPU, éventuellement un cryptoprocesseur associé à cette unité, des circuits de commandes des bus de données et d'adresses ainsi que les mémoires RAM, ROM et EEPROM ou toutes mémoires d'un autre type.

Le micro-contrôleur 30 selon l'invention comprend par ailleurs un générateur d'impulsions GEN, une capacité CAP et un commutateur COM. Le générateur d'impulsions, la capacité et le commutateur sont des moyens pour faire varier la tension d'alimentation du micro-contrôleur efficace.

Le générateur d'impulsions GEN est par exemple formé de deux oscillateurs constitués, pour chacun d'entre eux, d'un inverseur avec hystérésis de type Schmitt sur le circuit d'entrée, d'une capacité connectée entre l'entrée de l'inverseur et la masse et d'une résistance connectée entre la sortie de cet inverseur et son entrée, lesdits deux oscillateurs étant couplés entre eux par une résistance pour constituer une source de signal à fréquence modulée. En outre, le générateur d'impulsions GEN comprend avantageusement un circuit de synchronisation de franchissement d'une tension de seuil V_{seuil} de la tension VμCE aux bornes du micro-contrôleur efficace. Ce circuit peut être formé d'un comparateur de tension dont l'entrée positive est reliée à une tension de référence, la tension V_{seuil}, dont l'entrée négative est connectée à la tension aux bornes du micro-contrôleur efficace, et dont

la sortie est reliée à l'entrée D d'une bascule synchronisée par le signal de synchronisation issu de la source de signal à fréquence modulée.

La capacité CAP a une capacité supérieure à environ 0,1 nanofarad, notamment comprise entre environ 1 nanofarad et environ 10 nanofarads, par exemple de l'ordre de 6 nanofarads. On notera que les électrodes d'une capacité de 1,5 nanofarad ont une surface de l'ordre de 1 mm^2. Aussi, une capacité de 6 nanofarads a une surface de l'ordre de $4mm^2$.

Le commutateur COM peut être, dans l'invention, remplacé par une résistance variable en fonction du temps connecté en série avec le plot VCC d'alimentation du micro-contrôleur.

Dans l'invention, les plots I/O, RST et CLK sont connectés, par des lignes de connexion électrique, au micro-contrôleur interface µCI. Le plot GND est connecté, par des lignes de connexion électrique, au générateur d'impulsions GEN, à la capacité CAP, au micro-contrôleur efficace µCE et au micro-contrôleur interface µCI. D'autre part, le plot VCC est connecté, par des lignes de connexion électrique, au générateur d'impulsions GEN, au commutateur COM et au micro-contrôleur interface µCI. Par ailleurs, le commutateur COM est connecté, par des lignes de connexion électrique, au générateur d'impulsions GEN et à la capacité CAP. Enfin, une ligne de connexion électrique relie le micro-contrôleur efficace µCE à la ligne de connexion électrique reliant la capacité CAP au commutateur COM et une ligne de connexion électrique relie le générateur GEN à cette dernière ligne de manière à permettre la surveillance de la tension $V_{\mu CE}$ pour sa comparaison avec la tension V_{seuil}.

Dans le cas d'un micro-contrôleur du type de la figure 4, les éléments précités sont arrangés à la manière représentée aux figures 6A et 6B dans laquelle la couche complémentaire 302 (figure 6B) comprend le générateur d'impulsions GEN, la capacité CAP et le commutateur

COM, et la couche principale 301 (figure 6A), qui porte les plots de contact, comprend les parties micro-contrôleur efficace µCE et micro-contrôleur interface µCI.

En outre, la couche principale 301 comprend trois plots d'interconnexion P1, P2 et P3, un premier plot P1 connecté au plot VCC, un second plot P2 connecté au micro-contrôleur efficace et un troisième plot P3 connecté au plot GND.

De même, la couche complémentaire 302 comprend trois plots d'interconnexion P1', P2' et P3' destinés à venir se placer, dans le micro-contrôleur, au regard et à la verticale des plots P1, P2 et P3, respectivement. Le premier plot P1' est connecté, d'une part, au commutateur COM et, d'autre part, au générateur d'impulsions GEN, le second plot P2' est connecté au point commun entre le commutateur COM et la capacité CAP et le troisième plot P3' est connecté, d'une part, à la capacité CAP et, d'autre part, au générateur d'impulsions GEN.

Dans le micro-contrôleur 30 de la figure 4, les plots P1, P2 et P3 sont respectivement électriquement connectés aux plots P1', P2' et P3' par l'intermédiaire de bossages conducteurs.

Bien entendu, le micro-contrôleur présenté ci-dessus ne constitue qu'un mode de réalisation selon l'invention et il est tout à fait possible de prévoir d'autres modes de réalisation de micro-contrôleurs ne montrant pas une structure en plusieurs couches mais une structure plus classique dans laquelle les différents éléments précités : plots de contact, micro-contrôleurs interface et efficace, capacité, générateur d'impulsions et commutateur, sont intégrés dans une mono-couche de substrat silicium non recouverte d'une couche complémentaire.

L'énergie $Ec_{\mu C}$ consommée par un micro-contrôleur selon l'invention est égale à la somme des énergies $Ec_{\mu CI}$, $Ec_{\mu CE}$ et Ec_M consommées respectivement par le micro-contrôleur interface, le micro-

contrôleur efficace et l'ensemble générateur d'impulsions/capacité/commutateur. On a donc la relation :

$$Ec_{\mu C} = Ec_{\mu CI} + Ec_{\mu CE} + Ec_{M}$$

L'énergie $Ec_{\mu CI}$ consommée par le micro-contrôleur interface n'est pas révélatrice des instructions exécutées par le micro-contrôleur 30 et par suite pas révélatrice des données confidentielles mises en jeu dans l'exécution desdites instructions.

Les portes élémentaires du micro-contrôleur efficace sont des inverseurs 40 tels que montrés à la figure 7. Ces inverseurs 40 sont formés d'un transistor 401 de type P connecté en série avec un transistor 402 de type N. Le transistor P est porté à la tension $V_{\mu CE}$ et le transistor N est mis à la masse GND. Une capacité C_i est associée à chaque inverseur 40. Cette capacité C_i est la capacité équivalente aux capacités physiques des lignes d'interconnexion de l'inverseur et aux capacités des grilles formant les transistors P et N de l'inverseur éventuellement connecté en aval de l'inverseur de la figure 7.

D'un point de vue fonctionnel, les transistors P et N sont commandés par un signal de commande commun V_e correspondant à la tension en entrée de l'inverseur. Lorsque ce signal transporte un 0 logique (V_e = GND), le transistor P est passant et le transistor N est bloqué de sorte que l'on obtienne un 1 logique en sortie ($V_s = V_{\mu CE}$) et que la capacité C_i se charge. Par contre, lorsque ce signal transporte un 1 logique ($V_e = V_{\mu CE}$), le transistor P est bloqué et le transistor N est passant de sorte que l'on obtienne un 0 logique en sortie (V_s = GND) et que la capacité C_i se décharge.

La figure 8 montre les variations du signal de commande V_e, de l'intensité du courant d'alimentation i_{cc} et du signal de sortie V_s en fonction du temps t, dans le cas où la fréquence de travail de l'inverseur est égale à $F_{\mu CE}$, qui est en général la fréquence de l'horloge imposée par le terminal via le plot CLK, mais qui peut être une fréquence

particulière, dans le cas où le micro-contrôleur est pourvu de moyens de génération d'une horloge interne.

Lorsque la tension V_e est constante, les transistors P et N sont bloqués et l'inverseur 40 est parcouru par un courant de fuite non visible à la figure 8 dont la valeur moyenne est I_f sur une période $1/F_{\mu CE}$. L'énergie dissipée, ou énergie statique E_s, est alors égale à :

$$E_s = V_{\mu CE}\, I_f / F_{\mu CE}.$$

Lorsque la tension V_e varie de manière que le signal à l'entrée de l'inverseur passe d'un 1 logique à un 0 logique ou réciproquement, l'intensité du courant i_{cc} varie à la manière indiquée à la figure 8.

L'inverseur consomme une énergie de court circuit E_{cc}, qui est égale à :

$$E_{cc} = V_{\mu CE}\, I_{SC} / F_{\mu CE}$$

où I_{SC} est la valeur moyenne de l'intensité du courant de court circuit sur la période $1/F_{\mu CE}$.

De surcroît, lorsque la tension V_e varie de manière que le signal à l'entrée de l'inverseur passe d'un 1 logique à un 0 logique, la capacité C_i se charge jusqu'à atteindre la valeur de tension $V_{\mu CE}$ et l'énergie dynamique E_d alors consommée est égale à la somme de l'énergie emmagasinée dans la capacité C_i sous forme d'énergie électrostatique et de l'énergie dissipée dans la résistance équivalente de limitation du courant de charge, ici le transistor de type P, soit :

$$E_d = 1/2\, C_i\, V^2_{\mu CE} + 1/2\, C_i\, V^2_{\mu CE} = C_i\, V^2_{\mu CE}.$$

Enfin, lorsque la tension V_e varie de manière que le signal à l'entrée de l'inverseur passe d'un 0 logique à un 1 logique, la capacité C_i se décharge au travers du transistor N en dissipant l'énergie préalablement emmagasinée et égale à $1/2\, C_i\, V^2_{\mu CE}$.

Pour un inverseur réalisé en technologie CMOS, E_{cc} est inférieure à 20 % de E_d et E_s est très inférieure à E_d. Aussi, l'énergie E_c consommée

par l'inverseur i est principalement dynamique et on estime que E_c est sensiblement égale à E_d.

Aussi, l'énergie consommée par le micro-contrôleur efficace sur une transition d'horloge est, lorsque ledit micro-contrôleur efficace est alimenté par la tension $V_{\mu CE}$, sensiblement égale à :

$$Ec_{\mu CE} = \sum_{i=1}^{i=N} \alpha_i C_i V^2_{\mu CE}$$

où $\alpha_i = 1$ lorsque l'inverseur i consomme une énergie en faisant notamment l'objet d'une commutation durant cette transition et $\alpha_i = 0$ lorsque l'inverseur i ne consomme pas d'énergie en ne faisant notamment pas l'objet de commutation au cours de cette transition et où N est le nombre d'inverseurs dans le micro-contrôleur efficace.

L'énergie consommée par le micro-contrôleur efficace varie donc avec le carré de sa tension d'alimentation $V_{\mu CE}$.

L'énergie Ec_M consommée par les moyens de l'invention est égale à l'énergie Ec_{GEN} consommée par le générateur d'impulsions GEN additionnée à l'énergie Ec_{COM} consommée par le commutateur COM et à l'énergie Ec_{CAP} consommée par la capacité CAP. Aussi :

$$Ec_M = Ec_{GEN} + Ec_{COM} + Ec_{CAP}$$

L'énergie Ec_{GEN} consommée par le générateur d'impulsions GEN est du même type que l'énergie consommée par le micro-contrôleur interface. En effet, elle ne révèle aucune indication sur les données confidentielles mises en jeu dans l'exécution des instructions.

L'énergie Ec_{COM} consommée par le commutateur COM est en fait l'énergie dissipée par ce commutateur lorsque la capacité CAP se charge. Aussi :

$Ec_{COM} = Ec_{CAP}$ durant sa charge.

L'énergie Ec_{CAP} consommée par la capacité CAP dépend de l'état ouvert ou fermé du commutateur COM. L'état ouvert ou fermé du commutateur COM est commandé par le générateur d'impulsions GEN. En effet, ce générateur est apte à envoyer un signal S de commande

d'ouverture ou de fermeture du commutateur COM. Selon le signal S reçu, ce commutateur est fermé ou ouvert. Il est fermé pendant des intervalles de temps T_{on}. Il est ouvert pendant des intervalles de temps T_{off}.

Dans l'intervalle de temps T_{off} la capacité se décharge et l'énergie qu'elle consomme est égale à $Ec_{CAP}(T_{off})$ telle que :

$$Ec_{CAP}(T_{off}) = - 1/2\ C\ \Delta V^2$$

où ΔV représente la variation de tension aux bornes de la capacité dans T_{off}.

Dans l'intervalle de temps T_{on}, la capacité, alimentée par le courant d'intensité Icc, se charge, et son énergie consommé Ec_{CAP} (T_{on}) est égale à :

$$Ec_{CAP}(T_{on}) = 1/2\ C\ \Delta V^2$$

où ΔV représente la variation de tension aux bornes de la capacité dans T_{on}.

Un fraudeur n'a accès qu'à l'intensité du courant d'alimentation du micro-contrôleur dans son ensemble et par suite qu'à l'énergie consommée par le micro-contrôleur dans son ensemble.

Dans l'intervalle de temps T_{off}, l'énergie consommée par le micro-contrôleur est égale à l'énergie consommée par le micro-contrôleur interface. En effet, le micro-contrôleur efficace est alimenté par la capacité CAP qui se décharge. Aussi, dans T_{off} :

$$Ec_{\mu C} = Ec_{\mu CI}.$$

Or, ainsi que cela a été vu plus haut, $Ec_{\mu CI}$ ne révèle aucune information sur le basculement des inverseurs du micro-contrôleur efficace et par suite aucune information sur les données confidentielles traitées. Aussi, grâce à l'invention, le fraudeur ne pourra pas avoir accès auxdites données pendant les intervalles de temps T_{off}.

Par contre, dans l'intervalle de temps T_{on}, l'énergie consommée par le micro-contrôleur est égale à l'énergie consommée par le micro-

contrôleur interface, additionnée à l'énergie consommée par les moyens selon l'invention et additionnée à l'énergie consommée par le micro-contrôleur efficace. Aussi :

$$Ec_{\mu C} = Ec_{\mu CI} + Ec_{\mu CE} + Ec_{M}.$$

Soit une instruction INS appliquée sur les mêmes opérandes OPE et exécutée par le micro-contrôleur selon l'invention. En pratique, cette instruction INS est exécutée sur quelques transitions d'horloge. A chaque transition d'horloge, une partie de l'instruction INS est exécutée et certains des N inverseurs du micro-contrôleur efficace font l'objet d'un changement d'état à cet effet.

L'énergie consommée par le micro-contrôleur efficace au cours d'une telle transition est directement proportionnelle au carré de la tension $V_{\mu CE}$ aux bornes dudit micro-contrôleur.

Comme la capacité CAP est connectée en parallèle avec le micro-contrôleur efficace, la tension $V_{\mu CE}$ aux bornes du micro-contrôleur efficace est la même que la tension V_{CAP} aux bornes de la capacité CAP. Aussi, la tension aux bornes du micro-contrôleur efficace varie constamment.

C'est la raison pour laquelle l'énergie consommée pour l'exécution d'une partie d'instruction INS et, a fortiori, pour une instruction INS, n'est pas toujours la même.

En fait, dans le cas d'instructions identiques appliquées aux mêmes opérandes, la différence entre les énergies consommées par le micro-contrôleur efficace est d'autant plus grande qu'elles sont fonctions du carré de la tension d'alimentation $V_{\mu CE}$ de ce micro-contrôleur.

Il résulte de ce qui précède que le principe cité dans le préambule de la présente description selon lequel $Ec_{\mu C}$ (T ; INS ; OPE) = constante n'est plus vrai dans l'invention et le fraudeur ne pourra donc pas accéder aux informations confidentielles.

Les figures 10A à 10D visualisent respectivement le signal S, l'intensité I_{CAP} du courant d'alimentation de la capacité CAP, la tension $V_{\mu CE}$ d'alimentation du micro-contrôleur efficace et l'intensité du courant Icc d'alimentation du micro-contrôleur en fonction du temps t.

Ainsi que cela est montré à la figure 10A, les intervalles de temps T_{off} et T_{on} varient d'une période $T_s = T_{off} + T_{on}$ à une autre. Le rapport cyclique $T_{off}/(T_{on} + T_{off})$ varie donc au cours du temps et, avantageusement, de manière aléatoire et par suite imprévisible pour le fraudeur. En outre, étant donné que la fermeture du commutateur COM n'est pas réalisée à l'instant précis où la tension aux bornes de la capacité atteint la valeur seuil V_{seuil} mais au premier coup d'horloge suivant cet instant, et que l'intervalle de temps entre ledit instant et ce premier coup d'horloge est variable, la valeur de $T_s = 1/F_s$ varie de manière aléatoire. Aux variations de T_s décrites ci-avant, s'ajoutent des variations de T_s dues à la manière dont est réalisée le générateur d'impulsions, comprenant deux oscillateurs couplés avec inverseur de type Schmitt.

D'autre part, ainsi que cela est montré à la figure 10B, l'intensité du courant I_{CAP} d'alimentation de la capacité CAP est positive durant les intervalles de temps T_{on} au cours desquels la capacité se charge. Par contre, I_{CAP} décroît dans ces intervalles jusqu'à ce que $I_{CAP}(t) = 0$. De ce fait, la capacité est en charge maximale au moment où le commutateur passe à l'état ouvert. Par ailleurs, l'intensité du courant I_{CAP} est négative dans les intervalles de temps T_{off} au cours desquels la capacité se décharge pour alimenter le micro-contrôleur efficace.

Ainsi que cela est montré à la figure 10C, la tension d'alimentation $V_{\mu CE}$ du micro-contrôleur efficace croît dans les intervalles de temps T_{on} et décroît dans les intervalles de temps T_{off}. ΔV représente la profondeur de la modulation de la tension aux bornes de la capacité.

Enfin, ainsi que cela est montré à la figure 10D, l'intensité Icc du courant d'alimentation du micro-contrôleur est égale à $I_{\mu CI}$ dans T_{off} puis augmente dans T_{on}, où elle est égale à $I_{\mu CI} + I_{CAP} + I_{\mu CE}$.

La figure 11 montre les variations de l'intensité du courant Icc en fonction du temps t, d'une part, dans le cas d'un micro-contrôleur selon l'état de la technique (signature A) et, d'autre part, dans le cas d'un même micro-contrôleur selon l'invention (signature B) pour l'exécution d'instructions identiques appliquées sur des mêmes opérandes. Bien que l'exécution de ces instructions se déroule de la même manière dans le temps, les courbes sont totalement différentes. Les pics d'intensité visibles sur la première courbe ne le sont plus sur la seconde courbe. Les intervalles de temps T_{off} et T_{on} apparaissent clairement sur la seconde courbe. Il est ainsi particulièrement difficile de déterminer quoi que ce soit concernant les données confidentielles à partir de la seconde courbe.

Bien entendu, la description du mode de réalisation de l'invention exposé ci-dessus n'est nullement limitative de l'invention qui doit se comprendre de manière large. D'autres modes de réalisation plus complexes sont susceptibles de donner des résultats particulièrement intéressants. Il s'agit par exemple du mode de réalisation présenté à la figure 12 montrant un micro-contrôleur muni de deux capacités CAP1 et CAP2, trois commutateurs COM1, COM2 et COM3 et trois signaux S1, S2 et S3 de commande de l'ouverture et de la fermeture des trois commutateurs COM1, COM2 et COM3, respectivement. Dans ce mode de réalisation, la capacité CAP1 est déchargée à une tension de référence, par exemple GND, au travers du commutateur COM3 alors que les commutateurs COM1 et COM2 sont ouverts, avant d'être rechargée au travers du commutateur COM1 alors que les commutateurs COM2 et COM3 sont ouverts. La capacité CAP1, une fois chargée au travers du commutateur COM1, se décharge dans la

capacité CAP2 en parallèle avec le micro-contrôleur efficace μCE au travers du commutateur COM2 alors que les commutateurs COM1 et COM2 sont ouverts. A la figure 13, on a montré le déroulement des signaux S_1, S_2 et S_3 dans le temps. Le mode de réalisation permet de consommer une énergie constante indépendante de l'activité du μCE. Il n'est plus possible d'obtenir des informations confidentielles en analysant le courant Icc. Ce mode de réalisation augmente la consommation énergétique du micro-contrôleur efficace.

REVENDICATIONS

1. Micro-contrôleur (30) destiné à être incorporé dans un objet portatif (1) du type carte à puce, comprenant au moins :

- un plot (VCC) pour l'alimentation en courant dudit micro-contrôleur (30) ;
- un plot (I/O) d'entrée et/ou de sortie de données ;
- une partie efficace de traitement de données (µCE) ; et
- des informations confidentielles ;

caractérisé en ce qu'il comprend en outre :

- des moyens (GEN, CAP, COM) pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement des données (µCE), lesdits moyens étant aptes à sécuriser lesdites données confidentielles contre des attaques en courant.

2. Micro-contrôleur (30) selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement de données (µCE) comprennent :

- une résistance variable en fonction du temps connectée en série avec le plot (VCC) d'alimentation du micro-contrôleur (30).

3. Micro-contrôleur (30) selon la revendication 2, caractérisé en ce que la résistance variable est un commutateur (COM) ouvert pendant des intervalles de temps T_{off} et fermé pendant des intervalles de temps T_{on}.

4. Micro-contrôleur (30) selon la revendication 3, caractérisé en ce que le rapport cyclique $T_{off}/(T_{on} + T_{off})$ varie en fonction du temps.

5. Micro-contrôleur (30) selon l'une des revendications 3 ou 4, caractérisé en ce que la période $T_{on} + T_{off}$ varie en fonction du temps.

6. Micro-contrôleur (30) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens pour faire varier la

tension d'alimentation de la partie efficace de traitement de données (µCE) comprennent :

- un générateur d'impulsions (GEN).

7. Micro-contrôleur (30) selon la revendication 6, caractérisé en ce que le générateur d'impulsions (GEN) comprend un circuit de synchronisation de franchissement de seuil de tension aux bornes de la partie efficace de traitement de données.

8. Micro-contrôleur (30) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement de données (µCE) comprennent :

- un condensateur.

9. Micro-contrôleur (30) selon la revendication 8, caractérisé en ce que le condensateur est une capacité (CAP).

10. Micro-contrôleur (30) selon l'une des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce que la capacité a une capacité supérieure à 0,1 nanofarad.

11. Micro-contrôleur (30) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte une couche principale (301) de silicium dont la face active, qui intègre un circuit et porte les plots (300) de contact, est scellée à une couche complémentaire (302) de protection au moyen d'une couche de scellement (303).

12. Micro-contrôleur (30) selon la revendication 11, caractérisé en ce que les moyens (COM, CAP, GEN) pour faire varier la tension d'alimentation de la partie efficace de traitement des données (µCE) sont situés dans la couche complémentaire de protection (302).

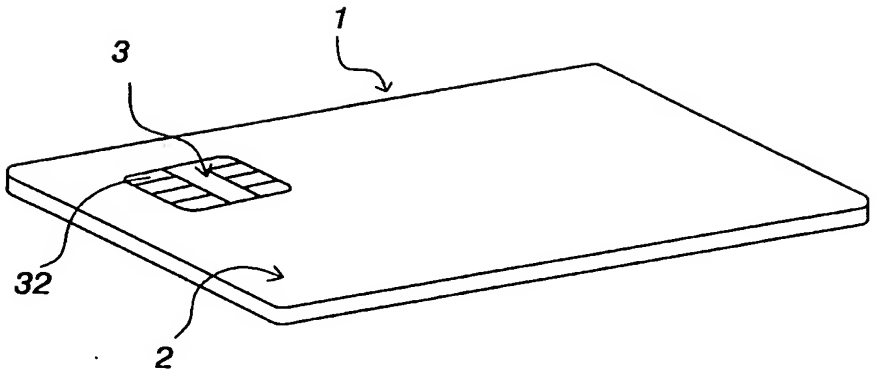


Fig.1

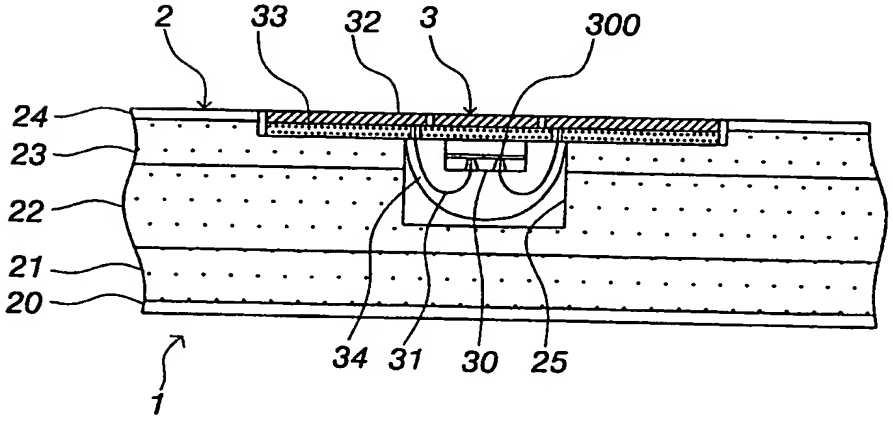


Fig.2

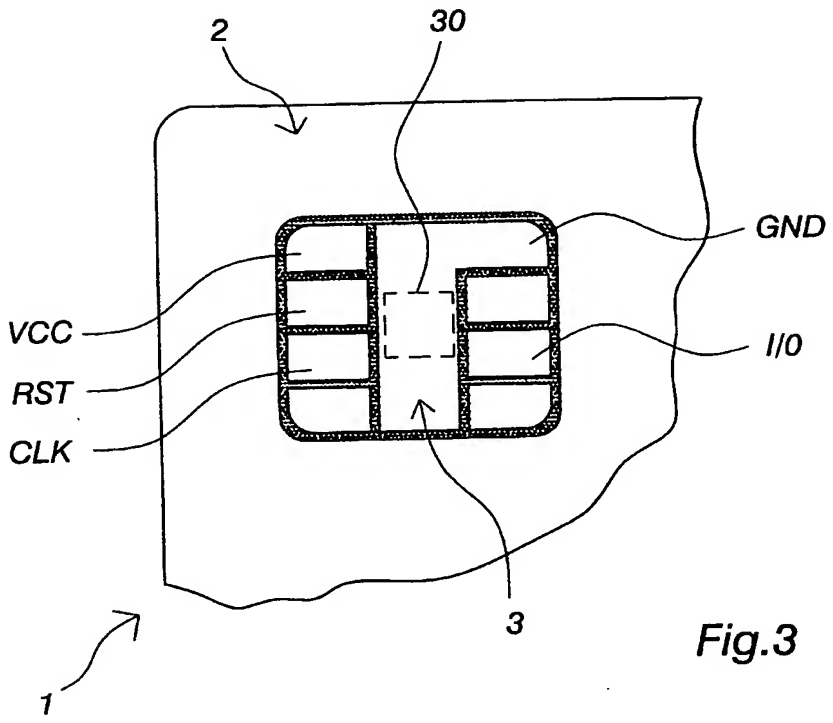

2
30
GND
VCC
RST
CLK
I/0
3
1

Fig.3

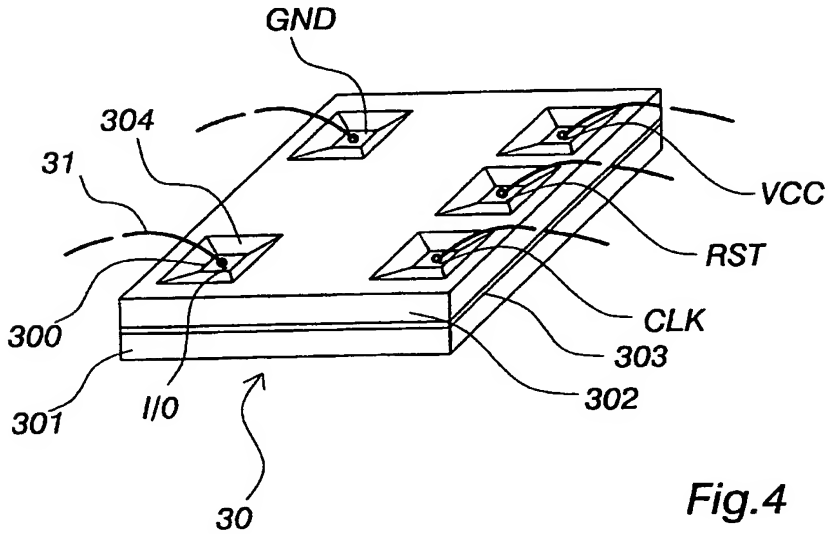

GND
304
31
VCC
RST
CLK
303
302
300
301
I/0
30

Fig.4

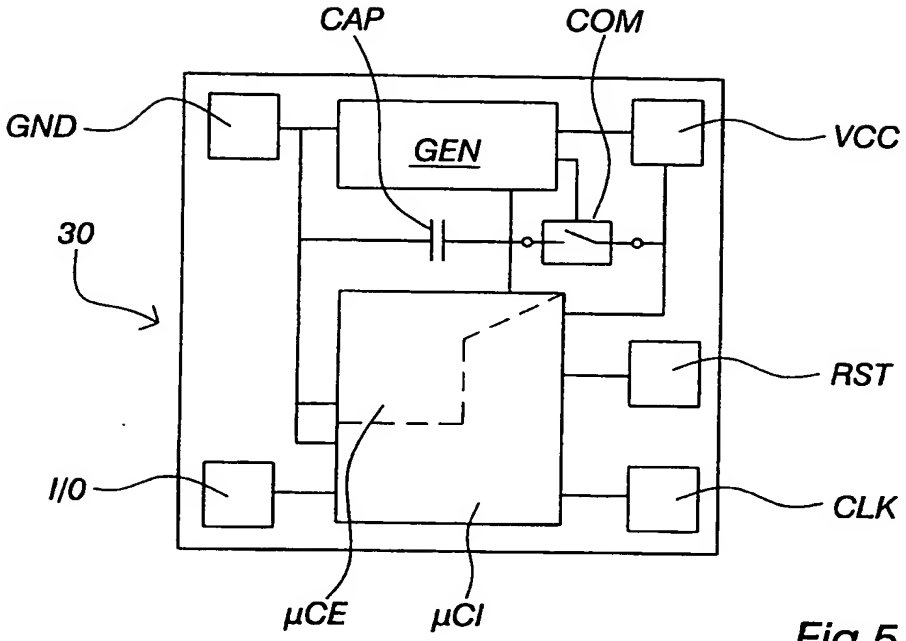

CAP
COM
GND
GEN
VCC
30
RST
I/O
CLK
µCE
µCI

Fig.5

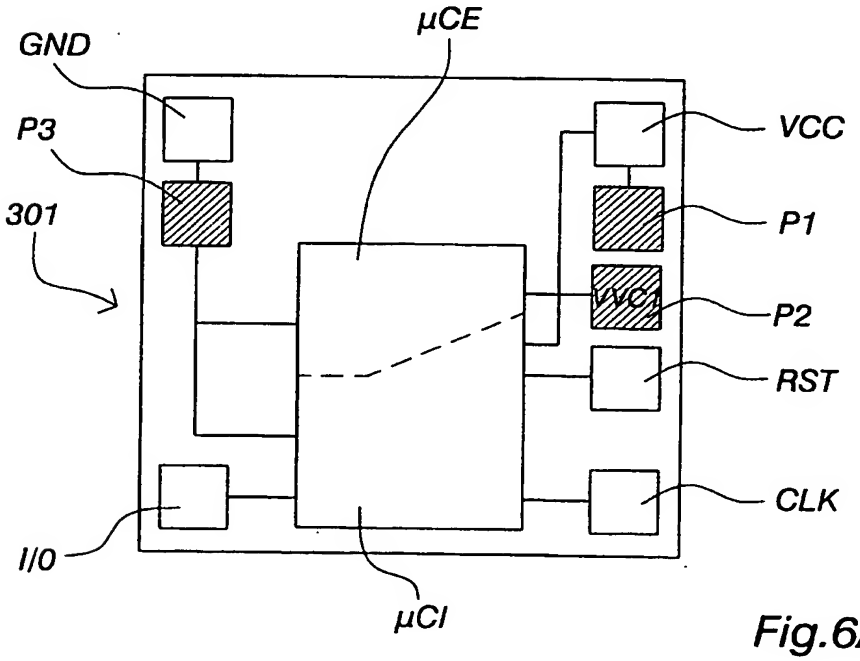

µCE
GND
P3
VCC
301
P1
VVC1
P2
RST
CLK
I/O
µCI

Fig.6A

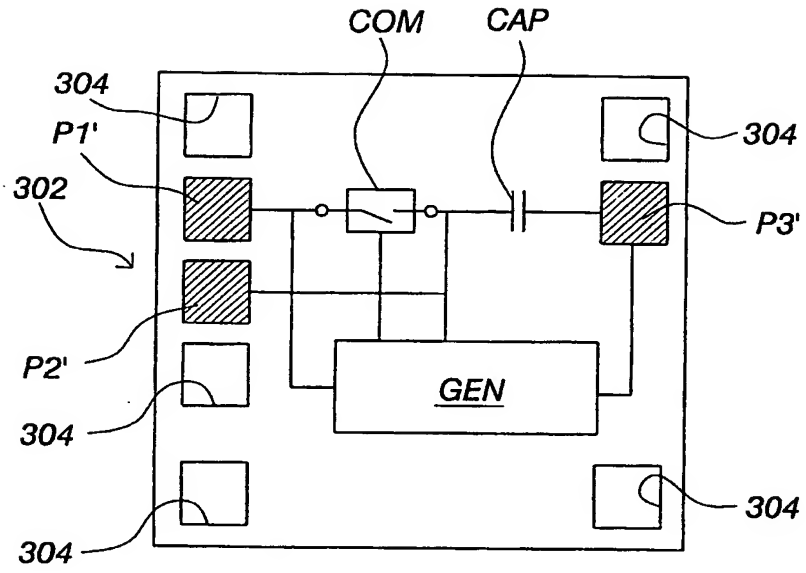

COM
CAP
304
P1'
302
304
P3'
P2'
GEN
304
304
304

Fig.6B

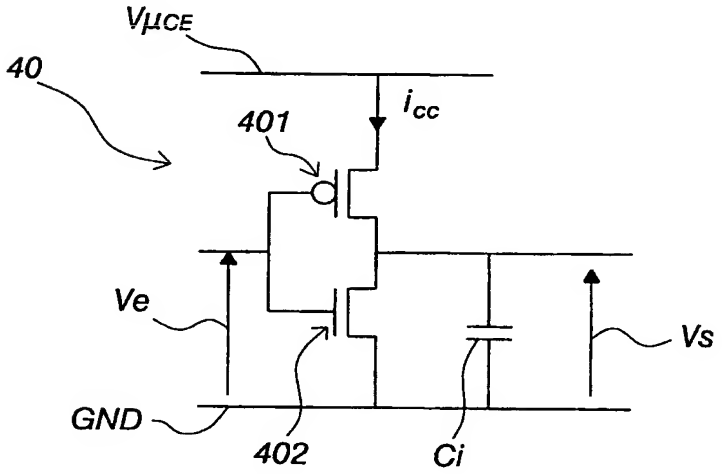

Vμce
40
401
icc
Ve
Vs
GND
402
Ci

Fig.7

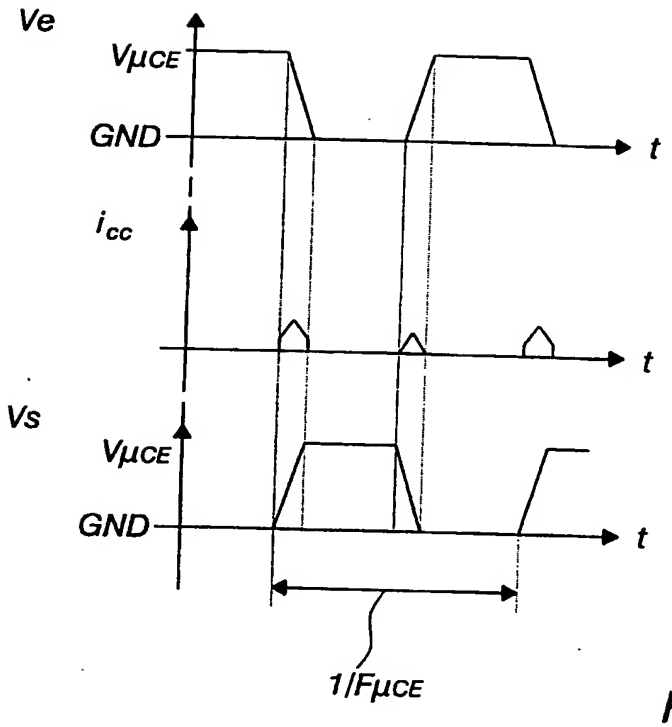

Ve
Vμce
GND
t
icc
t
Vs
Vμce
GND
t
1/Fμce

Fig.8

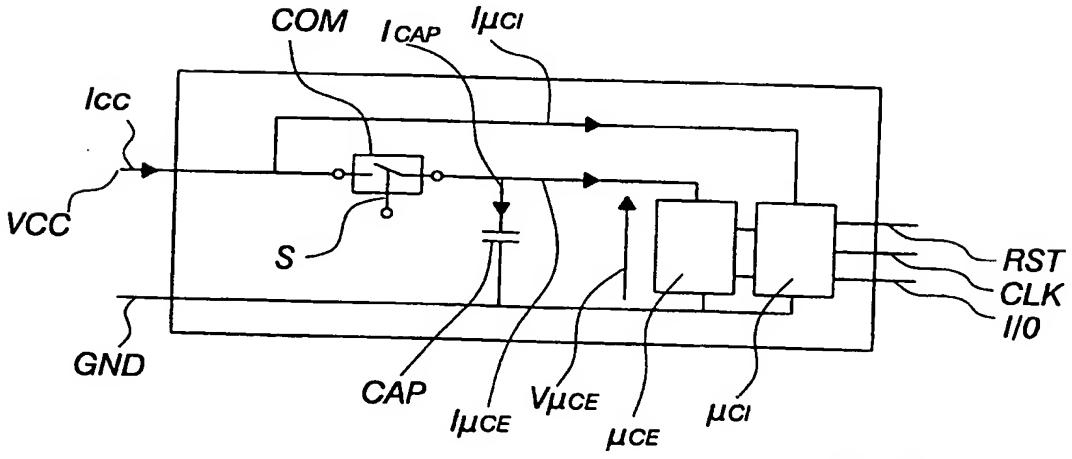

COM
ICAP
Iμcl
Icc
VCC
S
GND
CAP
Iμce
Vμce
μce
μcl
RST
CLK
I/0

Fig.9

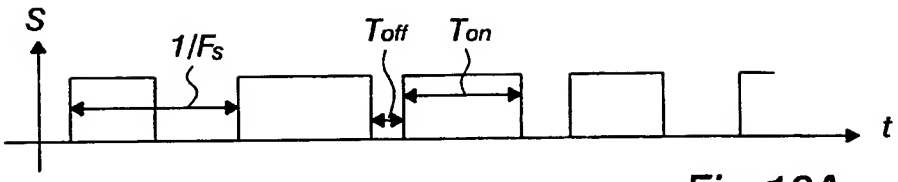


Fig.10A

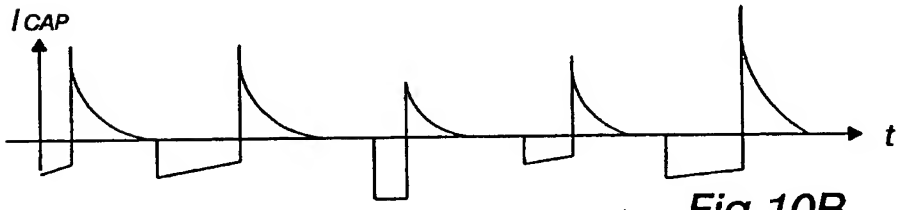


Fig.10B

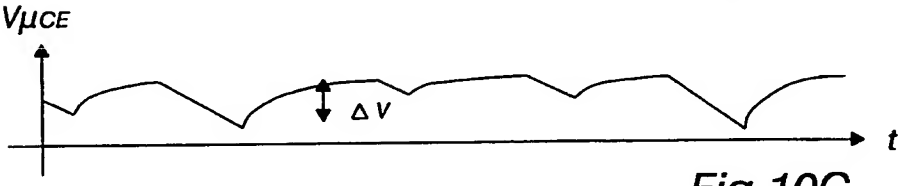


Fig.10C

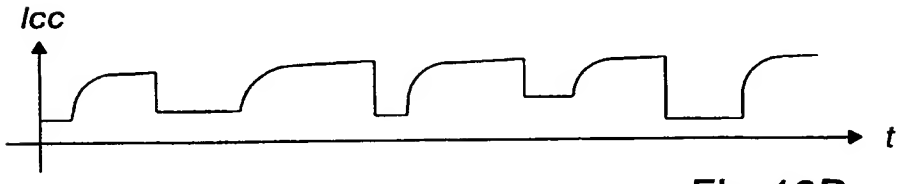


Fig.10D

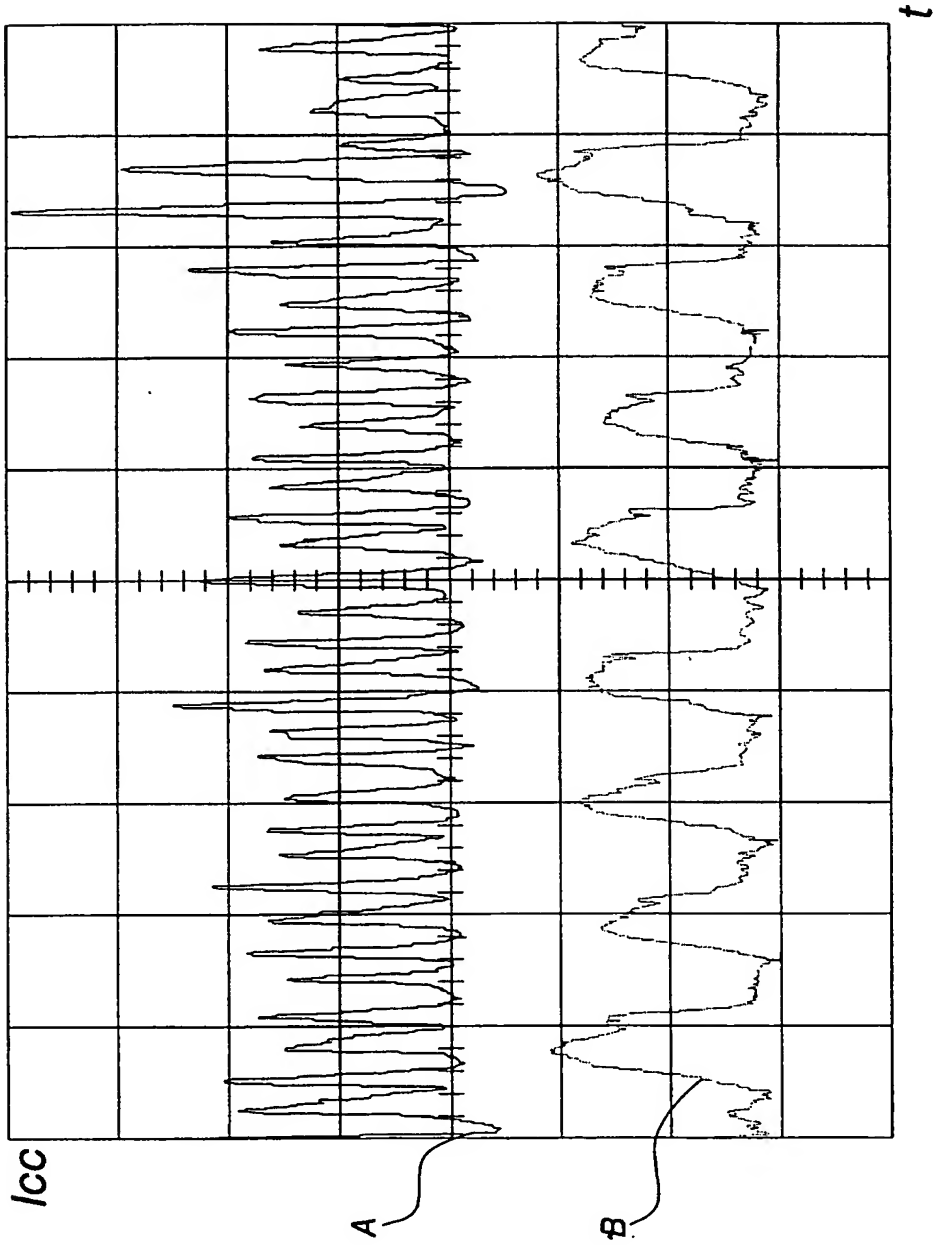


Fig.11

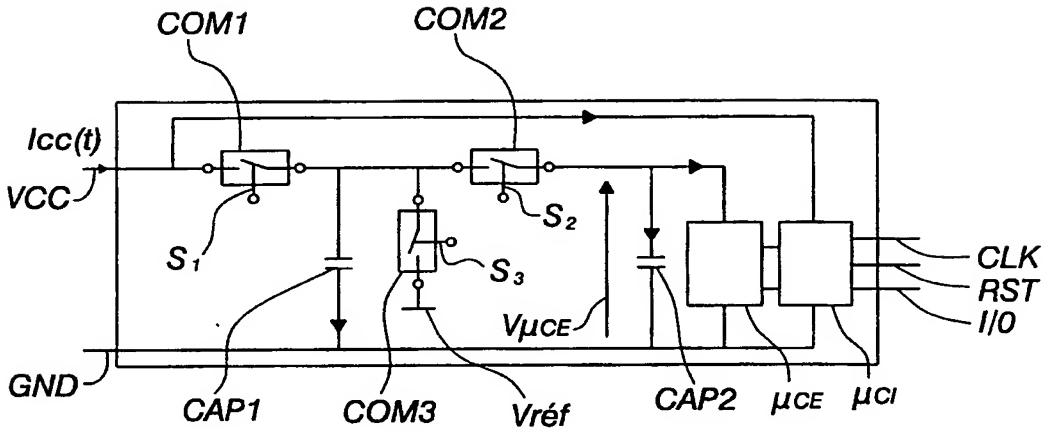

COM1
COM2
Icc(t)
VCC
S1
S2
S3
VμCE
CLK
RST
I/O
GND
CAP1
COM3
Vréf
CAP2
μCE
μCI

Fig.12

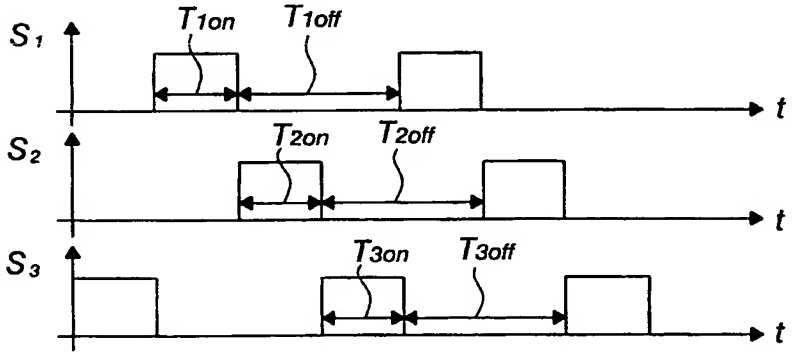

S1
T1on
T1off
t
S2
T2on
T2off
t
S3
T3on
T3off
t

Fig.13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Intern ial Application No
PCT/FR 00/02058

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G06K19/073

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 G06K G11C G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)
WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4 932 053 A (FRUHAUF SERGE ET AL) 5 June 1990 (1990-06-05) the whole document	1
A	US 4 827 451 A (FRUHAUF SERGE ET AL) 2 May 1989 (1989-05-02) column 4, line 18 -column 6, line 64; figures 2,4	1
A	EP 0 108 011 A (THOMSON CSF) 9 May 1984 (1984-05-09) page 2, line 20-34; figures 1,4,5	1

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
3 November 2000	10/11/2000

Name and mailing address of the ISA	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL – 2280 HV Rijswijk Tel. (+31–70) 340–2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31–70) 340–3016	Cardigos dos Reis, F

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

Intern[illegible]al Application No
PCT/FR 00/02058

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4932053 A	05-06-1990	FR 2638869 A	11-05-1990
		DE 68900160 D	29-08-1991
		EP 0368727 A	16-05-1990
		JP 2199561 A	07-08-1990
		JP 2813663 B	22-10-1998
US 4827451 A	02-05-1989	FR 2604554 A	01-04-1988
		DE 3766351 D	03-01-1991
		EP 0269468 A	01-06-1988
		JP 63106852 A	11-05-1988
EP 0108011 A	09-05-1984	FR 2535488 A	04-05-1984
		DE 3370217 D	16-04-1987

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Dema Internationale No
PCT/FR 00/02058

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 G06K19/073

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
CIB 7 G06K G11C G06F

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)
WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 4 932 053 A (FRUHAUF SERGE ET AL) 5 juin 1990 (1990-06-05) le document en entier	1
A	US 4 827 451 A (FRUHAUF SERGE ET AL) 2 mai 1989 (1989-05-02) colonne 4, ligne 18 -colonne 6, ligne 64; figures 2,4	1
A	EP 0 108 011 A (THOMSON CSF) 9 mai 1984 (1984-05-09) page 2, ligne 20-34; figures 1,4,5	1

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
3 novembre 2000	10/11/2000

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL – 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Cardigos dos Reis, F

1

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale No
PCT/FR 00/02058

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 4932053 A	05-06-1990	FR 2638869 A	11-05-1990
		DE 68900160 D	29-08-1991
		EP 0368727 A	16-05-1990
		JP 2199561 A	07-08-1990
		JP 2813663 B	22-10-1998
US 4827451 A	02-05-1989	FR 2604554 A	01-04-1988
		DE 3766351 D	03-01-1991
		EP 0269468 A	01-06-1988
		JP 63106852 A	11-05-1988
EP 0108011 A	09-05-1984	FR 2535488 A	04-05-1984
		DE 3370217 D	16-04-1987